PROTEÇÃO DE BANCO DE CAPACITORES SEM FUSÍVEIS USANDO RELÉS DIGITAIS

Malkiat S. Dhillon
Pacific Gas and Electric Co.
San Francisco, CA USA

Demetrios A. Tziouvaras
Schweitzer Engineering Laboratories,Inc
Pullman, WA USA

RESUMO

Este artigo revisa as tecnologias existentes sobre bancos de capacitores, discute as vantagens e desvantagens das diferentes tecnologias de capacitores e detalha as razões do por quê a Pacific Gas and Electric Co. (PG&E) está implementando a tecnologia de capacitores sem fusíveis em todos os novos projetos nos sistemas de 115 e 230 kV.

Adicionalmente, nós discutimos a proteção de bancos de capacitores em derivação e apresentamos técnicas inovadoras para bancos de capacitores em derivação sem fusíveis utilizando relés digitais para garantir uma completa e econômica proteção. Estas técnicas eliminam a necessidade de transdutores de alta tensão para proteção diferencial de tensão, garante mais sensibilidade para a proteção e desensibiliza o relé para variações de tensão no sistema, bem como para variação da capacitância causada pela temperatura. Este artigo também discute o benefício adicional da aplicação de relés digitais multifunção, incluindo a facilidade de identificar o invólucro do capacitor em curto-circuito, reduzindo o custo de manutenção e uma implementação mais simples de monitoração e controle.

INTRODUÇÃO

Numa rede de sistema de potência muitos componentes consomem uma grande quantidade de potência reativa. Por exemplo, reatores em derivação de linhas de transmissão e outras cargas industriais e comerciais necessitam de potência reativa. Correntes reativas sustentam os campos magnéticos em motores e transformadores. Suprindo ambas potências ativa e reativa pelos geradores será necessário um aumento da capacidade de geração e transmissão, porque as perdas no sistema aumentam. Capacitores em derivação ou compensadores síncronos instalados próximos dos centros de carga são outras formas de gerar potência reativa. Capacitores em derivação tem a vantagem de fornecer potência reativa próximo dos centros de carga, minimizando a distância entre as fontes geradoras e a carga e não apresentam problemas de manutenção associados aos compensadores síncronos. O controle da capacitância nos sistemas de transmissão e distribuição é uma das formas mais simples e econômica de manter a tensão no sistema, minimizando perdas e maximizando a capacidade do sistema.

PG&E opera uma das maiores redes de transmissão e distribuição nos Estados Unidos, com um pico de demanda máxima de cerca de 23 Gigawatts. PG&E tem uma quantidade grande de instalações com capacitores em derivação no seu sistema e planeja instalar ainda mais para atingir as demandas de potência reativa. Um suporte inadequado de reativo foi a causa mais significativa da maior perturbação na área da Western Systems Coordinating Council (WSCC) no verão de 1996. Colapso de tensão permanece como a grande preocupação da PG&E e de muitas outras concessionárias. Estudos conduzidos pelos engenheiros associados com a WSCC depois destas perturbações recomendaram suporte adicional de reativo aos centros de carga mais críticos. Em 1998, a PG&E instalou 425.6 MVAR de capacitores em derivação em uma subestação 115 kV e em duas subestações 230 kV. Estas instalações recentes de bancos de

capacitores em derivação e as instalações planejadas para o futuro, demandaram uma nova visão sobre os projetos de bancos de capacitores em derivação, especialmente na proteção e no controle destes bancos, além de minimizar os custos de instalação e operação. PG&E encarregou uma equipe de engenheiros de subestação e proteção e um pessoal de construção, operação e manutenção para avaliar as tecnologias de bancos de capacitores em derivação e recomendar um projeto padrão para os atuais e futuros projetos.

Este artigo discute diferentes tecnologias de bancos de capacitores em derivação, suas vantagens e desvantagens e as razões pelas quais a PG&E escolheu a tecnologia sem fusível para todas as novas instalações em seu sistema de 115 e 230 kV. Este artigo também enfoca o projeto de proteção para bancos de capacitores em derivação sem fusíveis, utilizando relés digitais e a economia e o benefício operativo deste projeto. Adicionalmente, nós apresentamos técnicas inovadoras que eliminam a necessidade de transdutores de alta tensão para proteção diferencial de tensão e asseguramos uma proteção mais sensível. Nós discutimos como estas técnicas deixam o ajuste do relé menos sensível a variações de tensão e variações da capacitância causadas pela temperatura.

TECNOLOGIAS DE BANCOS DE CAPACITORES EM DERIVAÇÃO

Antes de discutir a proteção de unidades capacitivas e bancos, vamos primeiro revisar as diferenças de projeto entre unidades capacitivas fabricadas hoje e aquelas fabricadas trinta anos atrás. A geração mais antiga de unidades capacitivas eram fabricadas com papéis Kraft muito refinados impregnados com PCB. O papel Kraft tinha muitas deformidades ou falhas. Muitas camadas de papel eram usadas entre as camadas de chumbo para evitar pontos fracos no projeto. Com este projeto o nível de esforço era baixo, mas as perdas dielétricas eram mais altas do que os projetos de capacitores atuais. As perdas dielétricas elevadas resultavam em pontos com temperaturas elevadas. Temperaturas elevadas aceleram a deterioração da capacidade dielétrica do capacitor. Falhas no material dielétrico resultavam em arcos contínuos, chamuscavam e geravam gases que estufavam os invólucros dos capacitores e eventualmente rompiam as caixas.

Hoje os capacitores são feitos com filme de polipropileno (ao invés de papel Kraft) e com fluidos dielétricos com características superiores aqueles com PCB. Os filmes de polipropileno são muito finos, puros e uniformes e com poucas falhas de projeto. Este projeto mais recente requer apenas duas ou três camadas de filme. Apesar de aumentar o nível de esforço, reduz as perdas dielétricas que resultam em temperatura inferiores para os pontos mais quentes. Como resultados dessas mudanças, as unidades capacitivas atuais não envelhecem rapidamente. Estufamento ou casos de ruptura agora são muito raros. Pelo fato das camadas de filme serem finas e de alta qualidade, falhas de elemento não causam arcos contínuos ou chamuscamento, ao invés das folhas de chumbo juntas.

Unidades capacitivas para aplicações em sistemas de potência são feitas com filme dielétrico de polipropileno, folha de alumínio e produtos impregnantes. A maior diferença entre unidades está no projeto interno do capacitor, por exemplo, o número de elementos em paralelo e série e se a proteção é por fusível externo, interno, ou sem fusível. Elementos capacitivos em uma unidade são conectados na matriz. As exigências elétricas da unidade capacitiva determinam o número de elementos em paralelo e em série. Do mesmo modo, exigências do banco determinam se as unidades capacitivas são conectadas em paralelo ou em série. Por exemplo, flutuações em banco de capacitores devem ser minimizadas com aplicações de filtros. Assim, os projetistas devem selecionar uma unidade capacitiva com muitos elementos em paralelo por grupo e muitas unidades capacitivas em série dentro do banco de capacitores. Além disso, o projeto deve ter uma unidade capacitiva com elementos que são desconectados quando falham e não curto-circuitam os elementos remanescentes no grupo.

Projeto de Unidades Capacitivas

Os três tipos de projeto de capacitores de potência listados abaixo podem afetar na seleção do esquema de proteção:

- Capacitores de potência com fusível externo.
- Capacitores de potência com fusível interno.
- Capacitores de potência sem fusível

Capacitores de Potência com fusível externo

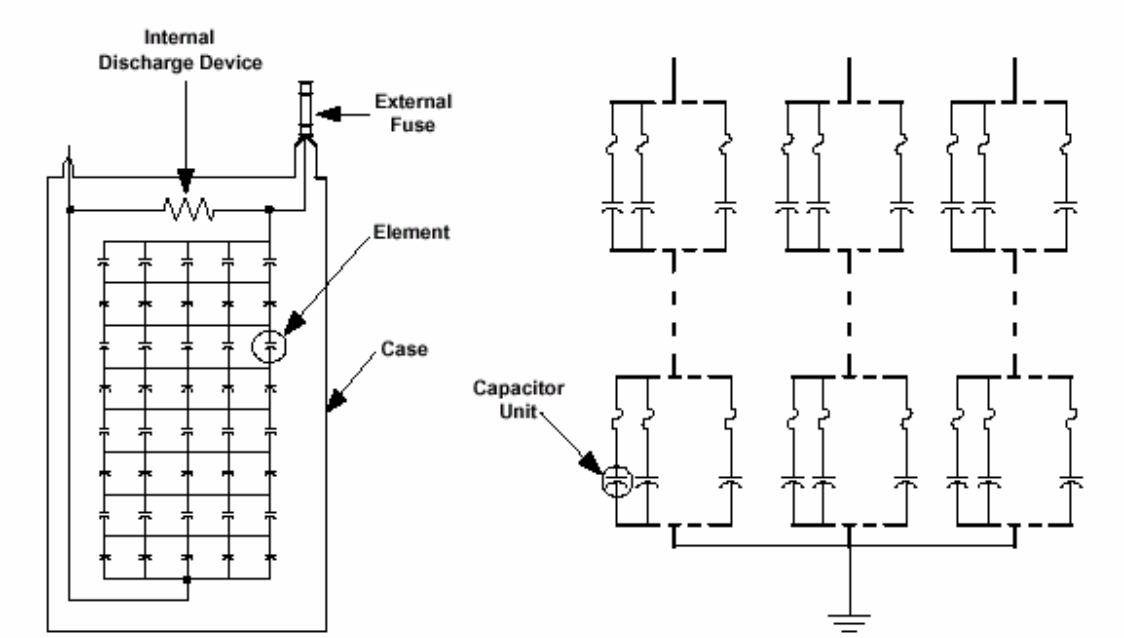
Fusíveis externos removem a unidade capacitiva com falha para impedir a ruptura do invólucro e permite que o resto do banco permaneça em funcionamento. Gerações anteriores de unidades capacitivas precisavam de fusíveis porque o papel Kraft impregnado em PCB deixava essas unidades muito vulneráveis para o rompimento do seu invólucro. Apesar de altamente refinado, o papel Kraft possuía muitas falhas: eram necessárias muitas camadas entre os eletrodos para assegurar razoavelmente um alto nível de isolamento. No caso de rompimento, a celulose do papel Kraft chamuscava, os eletrodos se mantinham separados e um arco sustentado levava a formação de gases e a um risco potencial de rompimento do invólucro. O rápido isolamento da unidade capacitiva era um requisito absolutamente necessário para evitar o rompimento do invólucro e prevenir vazamento de PCB.

A unidade capacitiva existente hoje, feita de filme de polipropileno, tem poucos defeitos e apenas duas ou três camadas de filme entre os eletrodos. No caso de um rompimento, o filme desaparece e permite que os eletrodos se unam ao invés de formar arcos. Este modelo é menos propenso a gerar gases e causar rompimento do invólucro. Além disso, o fusível externo não se rompe com a corrente adicional que circula pela unidade. Assim, a unidade capacitiva fica em funcionamento até que falhas adicionais de elementos em série causem a operação do fusível.

A Figura 1a mostra a construção de uma unidade capacitiva com fusível externo. Esse projeto possui muitos elementos em série dentro da unidade capacitiva. Cada grupo série consiste em poucos elementos em paralelo. Um banco de capacitor com fusível externo, mostrado na figura 1b, consiste em várias unidades capacitivas em paralelo dentro de cada grupo série, para ficar dentro da tolerância do kVAR fornecido no caso de uma falha sob condições normais de operação.

Banco de capacitores com fusível externos tem uma vantagem visível já que a unidade com falha é identificada pelo fusível rompido. Detecção de falhas incipientes e identificação de unidades com falhas parciais requer uma completa medição da capacitância em todas as unidades. Fusíveis intactos não indicam necessariamente que a unidade capacitiva está em perfeitas condições de operação, nem um fusível com falha indica necessariamente que a unidade capacitiva está com defeito. Além disso, quando o fusível opera em um banco de capacitores, o banco deve ser retirado de funcionamento para recolocação do fusível e prevenir que outra unidade capacitiva seja danificada por sobretensão ou sobrecarga.

Poluição, corrosão e variação das condições climáticas reduzem a confiabilidade do fusível externo. Esses fusíveis devem ser verificados e recolocados periodicamente. Isso aumenta os custos para o operador e a indisponibilidade do banco. Além disso, as conexões do banco não são isoladas e animais que sobem no banco podem causar descargas indesejadas e a saída do banco.



a. Unidade Capacitiva com Fusível Externo

b. Banco de Capacitores com Fusível Externo

Figura 1: Capacitores de Potência com Fusível Externo

Capacitores de Potência com Fusível Interno

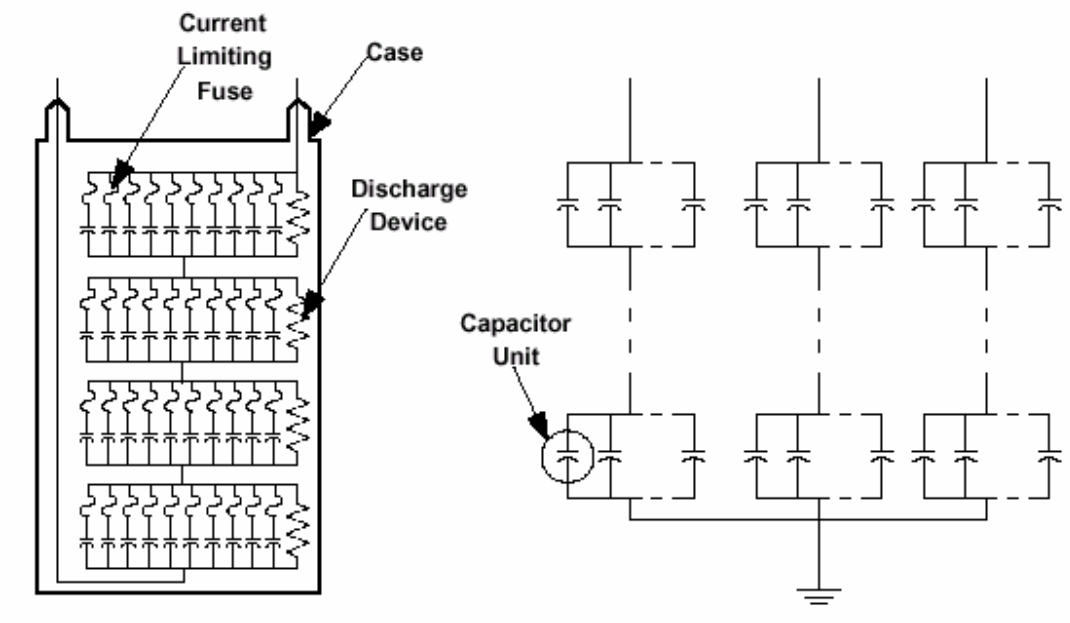
Fusíveis internos são fusíveis limitadores de correntes destinados a isolar elementos de unidades capacitivas danificados em uma unidade capacitiva e permitir a operação dos elementos renanescentes dentro da unidade. A figura 2a mostra o projeto típico de uma unidade capacitiva com fusível interno. Quando um elemento se danifica a sua isolação subseqüente remove apenas uma pequena parte da unidade capacitiva e permite que a unidade capacitiva e o banco permaneçam em funcionamento.

A filosofia de projeto de uma unidade capacitiva com fusível interno possui um grande número de elementos em paralelo em cada grupo série dentro do invólucro do capacitor. Um elemento danificado faz com que o fusível se rompa e isso, então, causa um pequeno aumento de tensão através dos elementos paralelos. Desde que a unidade capacitiva é projetada para limitar esse aumento de tensão, a unidade pode ser deixada em serviço indefinidamente. A desconexão instantânea de um elemento danificado evita que a unidade seja exposta a um arco sustentado, minimizando o risco de ruptura do invólucro do capacitor.

Algumas das vantagens da unidade capacitiva com fusível interno são:

- Não há necessidade para os fusíveis, da montagem de trilhos ou de isoladores.
- Fusíveis operam propriamente sem espaços elétricos entre unidades.
- O espaço para a saída da unidade capacitiva não é limitado pelo tipo e tamanho dos fusíveis externos que resultam numa redução substancial do número total de invólucros exigidos para um projeto de banco particular.

- O projeto do banco é bem compacto e contém poucas partes energizadas, fazendo com que seja muito fácil de cobrir e de isolar as conexões. Esse projeto reduz a exposição de problemas com animais e aumenta a confiabilidade e a disponibilidade do banco.



a. Unidade Capacitiva com Fusível Interno **b. Banco de Capacitores com Fusível Interno**

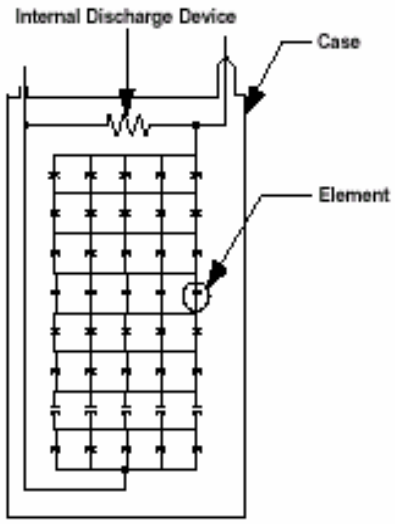
Figura 2: Capacitores de Potência com Fusível Interno

A filosofia de projeto de um banco de capacitores com fusível interno coloca muitas unidades em série dentro do banco como mostrado na Figura 2b. Esse é o projeto a ser escolhido para aplicações de banco de filtro onde as flutuações capacitivas do banco devem ser minimizadas, pois isso permite que a capacitância total permaneça dentro de pequenas tolerâncias, mesmo com muitos elementos danificados.

Capacitores de Potência sem fusível

Unidades capacitivas sem fusível eliminam a proteção por fusíveis. As funções desempenhadas pelos fusíveis nas gerações anteriores de projetos de capacitores têm se tornado secundário pela alta qualidade dos materiais de isolamento usados atualmente em capacitores. A filosofia de projeto de uma unidade capacitiva sem fusível, mostrada na Figura 3a, consiste de poucos elementos em paralelo e muitos em série. Esse modelo é similar ao usado para capacitores com fusível externo. A Figura 3b mostra a filosofia de projeto de um banco de capacitores sem fusível onde as unidades capacitivas são conectadas em série. A falha de um elemento capacitivo individual provoca um pequeno aumento de tensão nos elementos série renanescentes daquela coluna. Devido ao pequeno aumento na tensão distribuída por todos os elementos série da coluna é improvável a ocorrência de outras falhas.

O banco sem fusível tem as mesmas vantagens que modelo de banco de capacitores com fusível interno. Além disso, o modelo sem fusível produz menos perdas que um modelo com fusível já que não há perdas I^2R associadas com a unidade capacitiva ou fusíveis de capacitores.



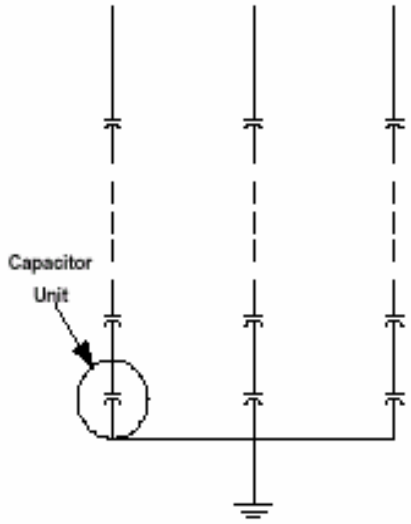


Figura 3a: Unidade Capacitiva sem Fusível **Figura 3b: Banco de Capacitores sem Fusível**

Figura 3. Construção do Capacitor sem Fusível

Anteriormente PG&E utilizava bancos de capacitores em derivação com fusível externo. Não somente a manutenção de fusíveis era um problema, mas havia também um vasto problema com o banco de capacitores, ruptura de invólucros, atuações de proteção do banco e vazamento de PCB. A equipe de projeto ao selecionar o novo modelo de banco de capacitores em derivação considerou todas essas questões bem como as vantagens do modelo sem fusível.

CONSIDERAÇÕES GERAIS DE PROTEÇÃO

Proteção de banco de capacitores em derivação requer um entendimento das capacidades e limitações das unidades capacitivas individuais, equipamento elétrico associado e performance do sistema de potência esperado. Ênfase em proteção é colocada em duas áreas: minimizar danos da falha e evitar operações falsas e indesejáveis.

A evolução do projeto interno e de materiais de unidades capacitivas tem tido maiores conseqüências no projeto de banco de capacitores e na proteção. Arcos elétricos e rupturas de invólucros não são mais as maiores causas de desligamento involuntário pela proteção do banco de capacitores. A maioria das atuações das proteções de banco de capacitores hoje são causadas por animais ou por outra causa como contaminação ou por erros humanos.

Capacidades e Limitações da Unidade Capacitiva

IEEE Std 18-1992 [1] especifica os valores padrões para os capacitores de potência em derivação conectados na transmissão e nos sistemas de distribuição. Abaixo há alguns valores nominais de unidades capacitivas em derivação extraídos de [1]. No entanto, sempre consulte as mais recentes normas IEEE e ANSI aplicáveis.

- Unidades capacitivas não devem fornecer menos que 100% e não mais que 115% da potência reativa nominal para a tensão senoidal e freqüência nominais, medidos a uma temperatura constante de 25°C no invólucro e internamente.

- Capacitores devem ser capazes de operações contínuas contanto que nenhuma das seguintes limitações forem excedidas:
  - 110 % do valor nominal da tensão eficaz, e 1.2 x √2 da tensão de pico da tensão nominal eficaz, incluindo harmônicas mas excluindo transitórios.
  - 180% do valor nominal da corrente eficaz, incluindo corrente fundamental e harmônica.
  - 135% do valor nominal da potência reativa (kVAr). Esse valor deve incluir os seguintes fatores e não devem ser excedidos por seus efeitos combinados:
    - Potência reativa causada por tensão acima do valor de placa na freqüência fundamental, mas dentro das limitações permitidas.
    - Potência reativa causada por tensões harmônicas superpostas à freqüência fundamental.
    - Potência reativa superior ao dado de placa causada por tolerâncias de fabricação.
- Unidades capacitivas com valores nominais acima de 600V devem ter um dispositivo de descarga interna para reduzir a tensão residual para 50V ou menos em 5 minutos.

Componentes do Banco de Capacitores

A Figura 4 mostra o diagrama unifilar do projeto da PG&E do capacitor sem fusível numa substação de 230 kV. Nesse projeto, há cinco blocos de banco de capacitores e cada bloco tem a potência nominal de 83.53 MVAR. Essa subestação está localizada no sul da Baía Área e atende as cargas muito críticas e sensíveis. A disponibilidade do banco de capacitores não pode ser compremetida, especialmente durante os meses de verão.

Uma quantidade de outros componentes do sistema de potência da Figura 4 merece uma discussão mais profunda.

Cada bloco de capacitor tem os seguintes componentes:

- Um fechamento do disjuntor sincronizado (tensão zero) para reduzir o transitório da corrente (“inrush”) durante a energização do banco e para isolar o banco durante problemas com o sistema ou com o banco.
- Um reator em série com o banco de capacitor para reduzir o transitório da corrente de energização (inrush) de alta magnitude e transitórios de alta freqüência durante o chaveamento back to back.

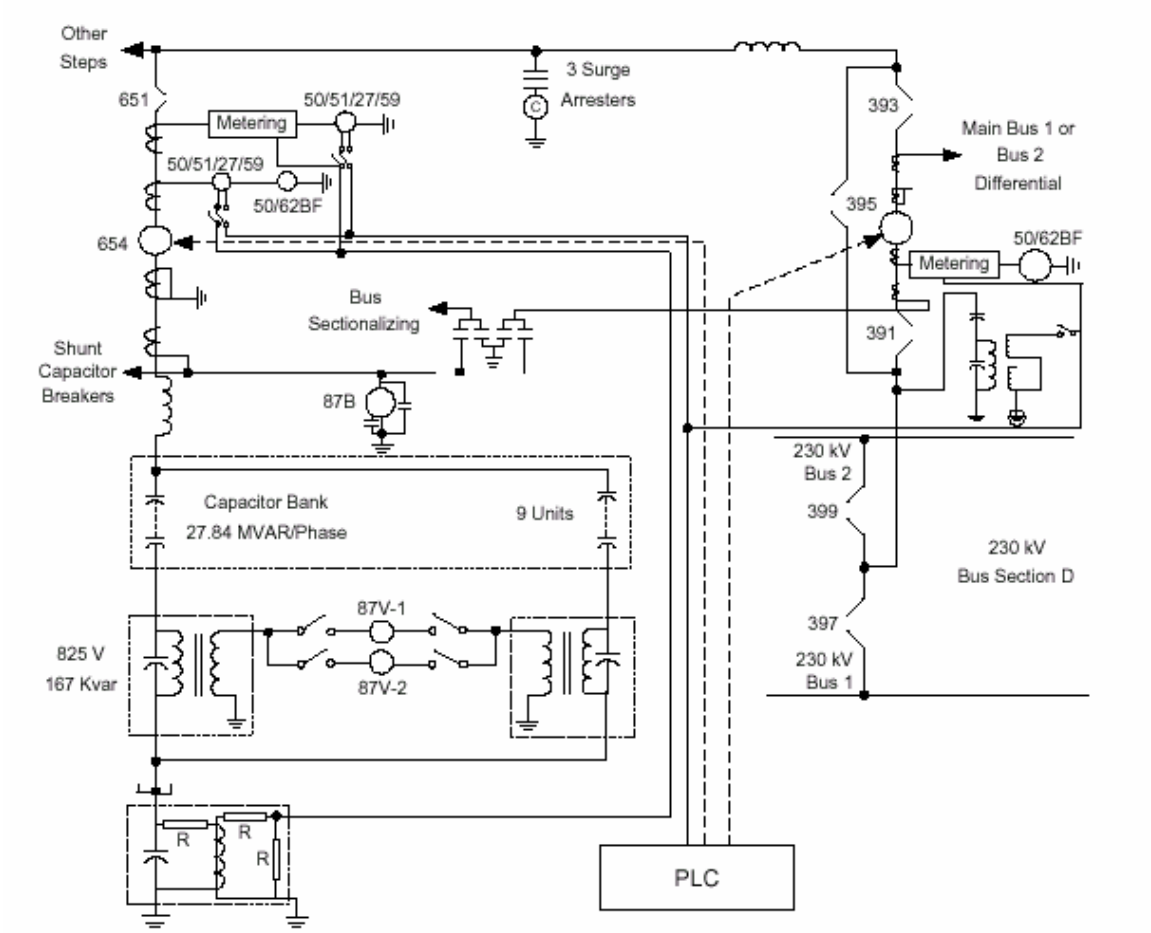


Figura 4: Diagrama Unifilar de um Bloco de Banco de Capacitores sem Fusível com potência nominal de 83.52 MVAR.

- Duas metades de cada fase, cada metade com um capacitor de baixa tensão com um transformador de potencial alimentando as entradas de um relé numérico conectado diferencialmente.
- Um capacitor de baixa tensão, um transformador de corrente e um divisor resistivo no neutro do banco de capacitores alimentam a entrada de um relé numérico para uma proteção de desequilíbrio do banco.
- Uma chave seccionadora entre o disjuntor e o barramento isola o bloco de capacitores do sistema de potência e abre um espaço para um trabalho seguro da equipe de manutenção.
- Três pára-raios de metal oxido reduzem os surtos de tensão causados pelo chaveamento do capacitor ou de descargas atmosféricas e protege os equipamentos da subestação.
- Um reator em série com o circuito do disjuntor principal para reduzir os transitórios de energização (inrush) do capacitor e os transitórios de fechamento de fim de linha ou falta nas proximidades do barramento da subestação (outrush).
- Um disjuntor principal operará como retaguarda para atuação da proteção no caso de falha do disjuntor do banco de capacitores. A seccionadora de transferência do disjuntor principal transfere o disjuntor durante a manutenção e faz o isolamento do sistema de potência para garantir um trabalho seguro.

- Todos os disjuntores são especificados para manobrar corrente capacitiva e equipados com um controle de fechamento sincronizado para reduzir as sobretensões e sobrecorrentes transitórias durante o chaveamento do banco de capacitores.
- Relés numéricos para a proteção contra faltas no sistema, condições anormais no sistema e problemas no banco de capacitores. A proteção para essa instalação é discutida com mais detalhes nas seções a seguir.
- Um controlador lógico programável (PLC) para executar a inserção e a remoção automática do capacitor baseada numa escala sazonal de nível de tensão pré-programada. Além disso, o PLC disponibiliza uma forma de balancear as operações do disjuntor, de controlar as seqüências de energização, dispara alarmes e executa algumas funções e monitoramentos.
- Foram feitos estudos pelo programa de transitórios eletromagnéticos (EMTP) para selecionar os valores otimizados de corrente de energização de reatores (inrush), de fechamento de final de linha ou faltas nas proximidades da barra (outrush), pára-raios e disjuntores.

PROTEÇÃO DE BANCO DE CAPACITORES EM DERIVAÇÃO SEM FUSÍVEL

Essa discussão enfoca primeiramente a proteção em instalações de banco de capacitores em derivação sem fusível e as vantagens que os relés numéricos multifunção adicionam a essa proteção. Leitores interessados em discussões de todos os aspectos de proteção a respeito de banco de capacitores em derivação devem consultar a última revisão do ANSI/IEEE C37.99-1990, IEEE Guide for Protection of Shunt Capacitor Banks, referência [2].

Devido os bancos de capacitores em derivação estarem disponíveis durante períodos longos de carga pesada, o esquema de proteção deve ser confiável e seguro, enfatizando ambos, banco e sistema de proteção. O sistema de proteção não deve desligar o banco de capacitores desnecessariamente pelo mau funcionamento do sistema, mas deve proteger o banco adequadamente mesmo quando alguns relés estão indisponíveis devido a falhas ou manutenção. Se uma unidade capacitiva apresenta um defeito, o sistema de proteção deve remover o banco de capacitores do sistema de potência antes deste ser muito danificado e antes que a falta no sistema evolua e cause um esforço adicional ao sistema de potência.

Os esquemas de proteção de banco eliminam faltas dentro do próprio banco. Essa proteção inclui esquemas que desconecta uma unidade ou um elemento capacitivo em falta, isola o banco na ocorrência de uma falta que pode levar a um dano catastrófico e alarma para indicar problemas potenciais no banco, alertando o pessoal para tomar uma decisão antes que o banco seja desligado pela proteção.

Os esquemas de proteção protegem o banco de capacitores de esforços impostos pelo sistema de potência e protegem o sistema de potência e equipamentos da subestação de esforços causados durante o chaveamento do banco ou em operação normal. Os sistemas de proteção podem incluir esquemas para limitar sobretensão e transitórios excessivos de sobrecorrente. Os esquemas de proteção disponibilizam alarmes e meios para desconectar todo o banco e prevenir condições anormais no sistema devido as falhas nos capacitores.

O sistema de proteção do banco de capacitores em derivação deve ser protegido contra as seguintes faltas ou anormalidades:

- Sobretensão contínua acima de 110% do valor da tensão eficaz nominal do capacitor caso isso seja causado por defeitos na unidade capacitiva ou por sobretensões sustentadas no sistema.
- Sobrecorrentes causadas por falhas individuais de unidades capacitivas ou faltas no barramento do capacitor.

- Arco sobre o capacitor dentro da gaveta.
- Descarga de correntes das unidades capacitivas paralelas.
- Correntes de energização (inrush) causadas pelo chaveamento do capacitor.

O uso dos princípios de proteção de sobrecorrente e sobretensão convencionais, assim como princípios de proteção de desequilíbrios e diferencias, podem resolver muitos desses problemas. Um projeto bem planejado de banco de capacitores pode eliminar ou minimizar a maioria dos problemas.

Proteção de Banco de Capacitores

Relés numéricos redundantes podem proporcionar proteção de banco de capacitores com as seguintes funções:

- Proteção de sobretensão.
- Proteção de subtensão (perda de potencial).
- Proteção diferencial por fase do capacitor.
- Proteção de desbalanço de tensão do neutro.

Essas funções proporcionam proteções para os seguintes casos:

- A função de sobretensão protege o capacitor contra danos causados por sobretensões sustentadas no sistema. Além disso, a tensão do sistema é reduzida com a remoção do banco de capacitores de operação.
- A função de subtensão previne danos de sobretensões transitórias e outros problemas relacionados à energização do banco de capacitores através de um transformador sem carga paralela significativa. Isto é realizado abrindo o disjuntor do banco de capacitor depois de cinco segundos após a perda de tensão do barramento, uma condição que indica a eliminação de uma falta na barra 230 kV ou um desligamento geral do sistema.
- Elemento capacitivo em falta ou falta para o casco do elemento capacitivo.
- Defeito na bucha ou defeito nas conexões da unidade capacitiva.
- Faltas no banco de capacitores ou nas unidades capacitivas, por exemplo, uma falta com arco elétrico no banco.
- Sobretensão contínua causada por elementos capacitivos em falta.
- Formação de arcos entre gavetas em dois grupos série, se as conexões não estiverem sido isoladas.

A Figura 4 mostra o projeto de uma conexão de um relé diferencial numérico. Cada fase do bloco do banco de capacitor é dividida ao meio. Uma pequena unidade capacitiva (167 kVARs, 825 Volts) perto do ponto neutro de cada fase dividida fornece uma tensão proporcional a corrente na coluna de capacitores para umas das entradas do relé diferencial. Um pequeno transformador de potencial conectado nesse capacitor reduz o nível de tensão para valores compatíveis com a tensão nominal de entrada do relé numérico. Esse projeto atende a um grande número dos objetivos desejados.

As conexões diferenciais através dos capacitores de baixa tensão eliminam a necessidade de transformadores de potencial capacitivo (CVTS) no lado de alta tensão de cada bloco. Anteriormente os projetos da PG&E usavam três CVTs no disjuntor do lado do capacitor para alimentar uma das entradas de tensão do relé diferencial numérico. O projeto proposto elimina essa necessidade de três CVTs por bloco de capacitor, resultando numa economia substancial.

Outro importante benefício do novo projeto é o melhoramento na proteção dos bancos de capacitores das variações de capacitância induzidas pela temperatura. Devido aos capacitores de potência e aos capacitores de baixa tensão serem projetados diferentemente, suas variações na capacitância induzidas pela temperatura são diferentes. Projetos usando CVTs de alta tensão para uma das entradas da proteção diferencial poderiam acarretar disparos indevidos de alarmes, mau funcionamento e redução de sensibilidade. Além disso, o novo modelo faz da proteção diferencial de tensão insensível a variações de tensão no sistema. A tabela 1 mostra a tensão secundária diferencial vista pelo relé diferencial e a percentagem de sobretensão vista pelos elementos capacitivos série remanescentes, em função dos elementos séries danificados. O alarme é ajustado para operar no caso de falha de três elementos capacitivos série e o limite da unidade diferencial é ajustado para operar no caso de falha de seis elementos série. A tensão secundária diferencial é calculada utilizando a equação 1.

$$\Delta V = |V_x| - k \bullet |V_y| \qquad \text{(Equação 1)}$$

Onde |Vx| e |Vy| são magnitudes das entradas das tensões secundárias para o relé diferencial de tensão. A constante k é ajustada para equilibrar a entrada de tensão do relé e anular a tensão diferencial. Essa constante é próxima de um e compensa as diferenças de capacitância devido as tolerâncias de fabricação. Pode-se calcular preliminarmente um ajuste para a constante k, mas deve ser ajustado em campo durante a instalação e comissionamento do banco de capacitores. Pode-se também usar essa constante para compensar a diferença de tensão que existe através dos capacitores de baixa tensão quando o número de colunas por fase for ímpar.

Devido a tensão secundária diferencial calculada pelo relé ser bastante pequena, como mostrado na Tabela 1, é importante aplicar um relé que tenha alta resolução e precisão.

Tabela 1: Percentagem de Sobretensão e Tensão Diferencial em Função de Elementos Séries Danificados

Número de elementos danificados	1	2	**3**	4	5	**6**	7	8	9
Percentagem de tensão	1.41	2.86	**4.35**	5.88	7.46	**9.09**	10.77	12.50	14.29
Tensão Diferencial (Volts)	0.6	1.22	**1.85**	2.51	3.18	**3.87**	4.59	5.32	6.08

A conexão diferencial do relé numérico também apresenta benefícios para operação e manutenção. Quando a proteção diferencial de tensão causa uma operação do banco de capacitores, o novo sistema de proteção notifica imediatamente a equipe de manutenção e operação qual a fase específica que causou a operação. O relatório de eventos também ajuda a equipe na identificação da coluna que possui a unidade ou elementos danificados. Isso auxilia a equipe a direcionar a pesquisa do problema para uma área específica, fazer os reparos necessários, e recolocar o banco em operação. Além de ajudar na pesquisa de defeitos após uma ocorrência, relatórios de eventos do relé numérico também municiam as equipes de valiosas informações para os ajustes normalmente necessários durante a fase inicial da instalação e no período de comissionamento.

A Figura 4 também mostra o projeto para uma proteção de desbalanço de tensão de neutro. Nesse projeto, um pequeno capacitor conecta o neutro do banco para a terra. Qualquer falta dentro de uma fase ou alguma falha no elemento da unidade capacitiva causa corrente de

seqüência zero que circula através do neutro do capacitor. Um transformador de corrente e um divisor resistivo ajuda a gerar uma tensão proporcional a essa corrente de seqüência zero. Um relé numérico multifunção detecta esse desbalanço e gera um alarme ou um comando de desligamento, dependendo do nível de desbalanço.

Esse novo projeto muito parecido com a proteção de desbalanço de tensão de neutro possui dois pontos particulares de interesse. Primeiro, esse projeto elimina a necessidade de um relé especial para a proteção contra desbalanços no neutro do banco de capacitores. E ainda, a tensão de entrada para o relé verificador de sincronismo é obtida através do divisor resistivo conectado ao capacitor de neutro do banco. Anteriormente projetos da PG&E usavam um relé estático exclusivo para essa função. Segundo, a proteção de desbalanço do neutro proporciona proteção de retaguarda para o esquema diferencial de tensão e ainda, proporciona proteção se uma quantidade de elementos série iguais falharem em ambas as metades de uma fase. Essa condição não pode ser detectada pelo esquema de proteção diferencial de tensão.

A Tabela 2 mostra a corrente de neutro e a tensão secundária aplicada em uma das entradas de tensão do relé numérico que executa a função de desbalanço de tensão de neutro, em função de elementos capacitivos séries danificados.

Devido ao desbalanço de tensão de neutro presente para o relé ser muito pequeno, como mostrado na Tabela 2, é importante aplicar um relé que possui alta resolução e precisão. Além disso o filtro do relé deve ser insensível para a tensão de terceiro harmônico que pode estar presente através dos capacitores de baixa tensão de neutro.

Tabela 2: Tensão e Corrente do Neutro do Banco de Capacitores em Função de Elementos Séries Danificados

Número de Elemento Danificados	1	2	**3**	4	5	**6**	7	8	9
Corrente de Neutro (Amperes)	0.46	0.94	**1.43**	1.93	2.45	**2.99**	3.54	4.10	9.68
Tensão de Neutro (Volts)	0.30	0.61	**0.93**	1.25	1.59	**1.92**	2.29	2.66	3.04

O processo de fusão descrito anteriormente proporciona um meio de isolar um grupo de elementos capacitivos paralelos numa unidade capacitiva e permite que a unidade permaneça em operação enquanto outros elementos ou unidades capacitivas não sejam expostas a sobretensões superiores a 110% do valor da tensão eficaz nominal.

Ambas as proteções a diferencial e a de desbalanço de neutro disparam alarmes para alertar o a equipe de operação sobre possíveis problemas no banco de capacitores.

Sistema de Proteção

A proteção total para essa instalação minimiza os danos da falta, proporciona alta disponibilidade do banco e reduz os custos de instalação e manutenção.

Relés numéricos multifunção proporcionam as seguintes funções para o sistema de proteção:

- Proteção de sobrecorrentes para faltas entre fases e fase-terra entre o disjuntor e o banco de capacitores utilizando relés numéricos redundantes.
- Função de sobretensão para proteger de tensão sustentada no sistema que pode causar falhas no invólucro do capacitor.
- Função de proteção de falhas de disjuntor para permitir eliminar a falta no caso de uma falha de um dos disjuntores do banco de capacitores.

- Função de perda de potencial utilizando elementos de subtensão para isolar bancos de capacitores do sistema de potência no caso de um desligamento geral do sistema. Além disso, essa característica permite uma reenergização ordenada do banco de capacitores após o reestabelecimento da tensão na barra principal de 230 kV.

Um esquema de proteção diferencial de barra de alta impedância proporciona uma proteção para a barra de capacitor. Fechando e abrindo as seccionadoras as contribuições de corrente para o esquema diferencial de barra mantêm a proteção de barra em operação enquanto o disjuntor principal estiver fora de serviço por alguma razão.

Um grupo de três transformadores de potencial capacitivo alimentam as entradas do relé numérico e o PLC para proteção e funções de controle. No entanto, projetistas podem usar agora novas tecnologias para criar um esquema de proteção de barra por comparação direcional usando as vantagens do relé numérico, já nessa instalação, para executar funções de proteção de banco de capacitores em derivação.

MONITORAMENTO E CONTROLE DE BANCOS DE CAPACITORES EM DERIVAÇÃO

O modelo apresentado na Figura 4 usa um controlador lógico programável (PLC) e relés digitais para fazer o monitoramento e o controle da instalação do banco de capacitores em derivação. Disjuntores de bloco de capacitores individuais executam o chaveamento do banco de capacitores em derivação. Existem dois modos de operação: manual e automático.

Modo Manual

No modo manual, operadores controlam o banco de capacitores da sala de controle através de chaves de controle do bloco instaladas no painel de comando. As seguintes condições de permissão devem ser satisfeitas antes de um bloco de capacitor ser ligado ou desligado pelas chaves de controle manuais.

- O bloco de capacitor deve estar no modo manual.
- O disjuntor deve ser aberto por pelo menos cinco minutos antes de ser fechado. Isso permite que os capacitores sejam descarregados através dos seus dispositivos internos de descarga para um nível de tensão seguro. Se o disjuntor não for aberto por cinco minutos, o controlador lógico programável bloqueia o circuito de fechamento e impede o operador a fechar o disjuntor.

Modo Automático

No modo automático, o PLC controla o chaveamento dos blocos de capacitores em derivação. O PLC é programado para executar o controle de tensão e registro de evento, o registro das operações de bloco, o equilíbrio das quantidades de operações de manobra e a comunicação com o Programa de Interfaces Gráficas (PGI) localizado na sala de controle. O PGI é utilizado para posicionar a tensão de ajuste e para visualizar o estado dos dispositivos do bloco de capacitores e do banco de alarmes.

Para executar a inserção automática do bloco, o PLC compara o ajuste da tensão de controle com a tensão medida na barra do sistema. O sistema de medição de tensão é executado usando dois transdutores. A diferença das saídas desses transdutores é comparada com os limites ajustados antes da medição de tensão do sistema ser aceita como válida. Uma banda morta de tensão faz parte também dos ajustes de chaveamento do bloco. O ajuste da banda morta deve ser maior que a variação da tensão causada pela adição ou remoção de um bloco de capacitores, para evitar "batimento" com o sistema. Os seguintes itens devem ser satisfeitos para inserir um bloco de capacitor:

- O bloco de capacitores deve estar no modo automático.
- Nenhum chaveamento no bloco de capacitores foi executado num período de dois minutos.
- Antes do bloco ser fechado, deve ser desenergizado por cinco minutos.
- O disjuntor principal está fechado e há tensão na barra.

A ordem de inserção do bloco de capacitores é seqüencial para equilibrar a quantidade de operações para cada bloco. Se todos os blocos tiverem o mesmo número de operações, a inserção é executada numa ordem numérica ascendente. Se o fechamento do bloco de capacitor falhar um alarme de "Bloco x Falha de Fechamento" é disparado e um programa de bloqueio é ativado, em cinco segundos. O programa de bloqueio previne operações adicionais, até que o problema seja resolvido e o operador rearme a chave de bloqueio do bloco de capacitores via PGI.

Uma remoção automática de bloco é executada de maneira similar ao de inserção de bloco. O PLC compara a tensão de sistema com a tensão de ajuste do controle. Se a tensão do sistema for maior que a tensão de ajuste mais o ajuste da banda morta, o PLC abre o bloco de capacitores na sequência "Primeiro que entra – Primeiro que sai" contanto que nenhuma ação tenha ocorrido nos últimos dois minutos. Se o bloco de capacitor falhar para abrir em cinco segundos, um alarme de "Bloco x Falha para Abrir" e um programa de bloqueio são ativados. O programa de bloqueio previne operações adicionais, até que o problema seja resolvido e o operador rearme a chave de bloqueio do bloco de capacitores via PGI.

A inserção rápida do bloco de capacitores pode auxiliar no desempenho do sistema no caso de uma perturbação de grande porte. O PLC monitora a taxa de variação da tensão para executar uma inserção rápida de um bloco de capacitores. Se a taxa de variação de tensão exceder 4 kV por segundo e a tensão do sistema cair 10% abaixo do nominal, o PLC emite os comandos para inserir blocos de capacitores em intervalos de dois segundos. A remoção rápida é também executada quando a tensão de sistema exceder a tensão nominal em 5%. Os blocos de capacitores são removidos a cada dois segundos até que a tensão do sistema esteja menor que 5% acima da tensão normal.

Uma quantidade de páginas diferentes do PGI monitora a operação de instalação do banco de capacitores.

O PGI mostra as seguintes telas:

- A tela de Estados do Sistema mostra o estado de operação do bloco de capacitor 230 kV e os valores analógicos medidos para cada bloco.
- A tela do Diagrama Unifilar mostra o diagrama unifilar da subestação, os contadores de abertura/fechamento e blocos de capacitores "Fora de Serviço".
- A tela de Ajuste de Tensão mostra o ajuste atual da tensão, e bandas mortas. Além disso, o operador pode fazer mudanças do ajuste da tensão a partir dessa tela.
- A tela de Alarme mostra até 28 mensagens de alarme do banco de capacitores 230 kV e de relés.
- A tela de Seqüência de Eventos permite acesso de 48 pontos dos últimos 50 eventos.

- A tela da Página de Manutenção permite o operador remover um bloco de uma seqüência automática, para rearmar a condição de bloqueio “Falha de abertura” ou “Falha de fechamento”.

PROTEÇÕES FUTURAS E APERFEIÇOAMENTOS DE PROJETOS DE CONTROLE

A equipe da “Subestação do Futuro” da PG&E está olhando para projetos de subestações futuras e aplicações de automação de subestação com o intuito de melhorar a confiabilidade do sistema e redução da instalação, manutenção e custos de operação. A Figura 5 mostra um projeto que está sendo analisado para uma futura instalação de bancos de capacitores em derivação.

Proteção de banco de capacitores, monitoramento e controle podem ser melhorados ainda mais usando a vantagem da nova tecnologia que está sendo disponibilizado. Abaixo há uma breve lista dos métodos que a PG&E está considerando para reduzir mais os custos e aumentar a confiabilidade:

- Usar a vantagem das grandezas medidas pelo relé numérico e remover os transdutores de medida usados no modelo atual. Os relés numéricos atuais fornecem informações com bastante qualidade e não é mais necessário o uso de transdutores adicionais.
- Usar botões de interface programáveis do relé numérico para controle manual de chaveamento - operações de blocos em complementação à interface do computador da subestação.
- Monitorar e controlar o chaveamento dos disjuntores de blocos usando um dispositivo local de E/S, que é conectado à lógica da proteção e ao “hub” da comunicação via cabos de fibra óptica, para reduzir interferência dos transitórios severos gerados na instalação do banco de capacitores devido à corrente de energização (inrush) ou transitórios de chaveamento “back to back”.
- Usar conexões das portas de comunicação do relé numérico entre a lógica de proteção e “hub” da comunicação para permitir a troca de dados entre os relés numéricos. O “hub” pode então ser usado para controle de tensão e funções de registrador de seqüência de eventos atualmente executadas pelo PLC. Alem disso, a lógica de proteção e o “hub” de comunicação pode ser usado para projetar um esquema de proteção de barra por comparação direcional e lógica de falha de disjuntor.

Um computador de subestação será então usado como uma interface homem-máquina para monitoramento, controle, e manutenção com o bloqueio dos blocos de capacitores em derivação.

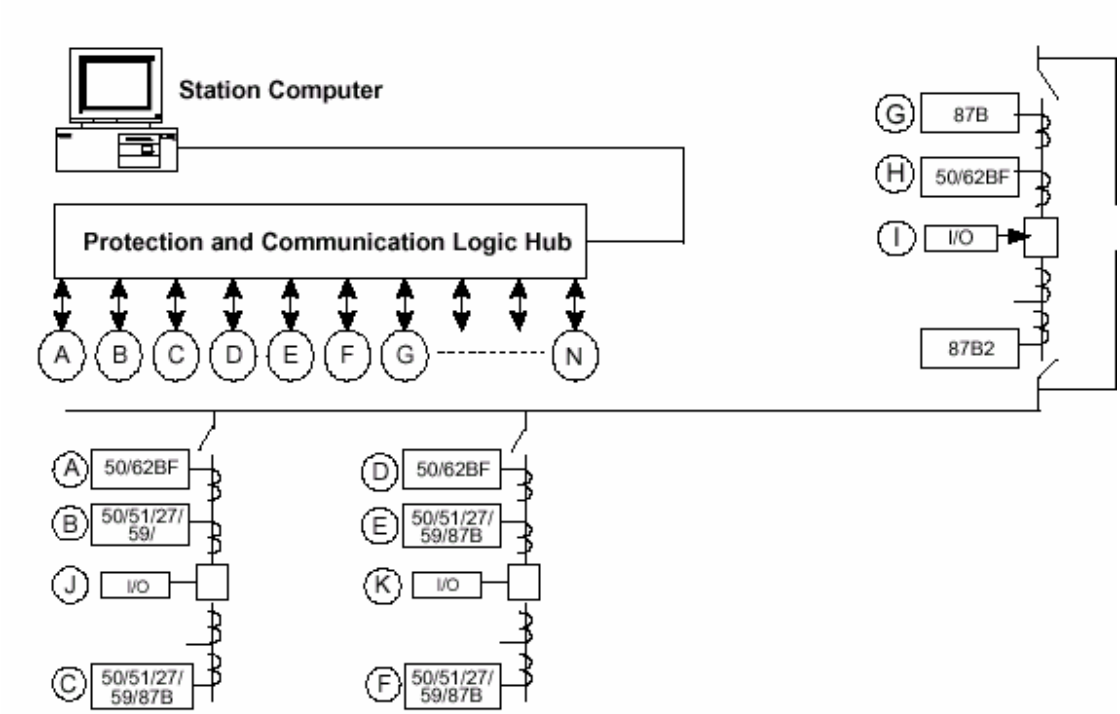


Figura 5: Proteção Futura de Capacitor em derivação, Controle, e Projeto de Esquema Alternativo de Monitoração.

CONCLUSÕES

1. Projetos alternativos e inovadores que são semelhantes às aplicações de banco de capacitores sem fusível em derivação, proporcionam proteções diferenciais de desequilíbrio de tensão sensíveis e de desequilíbrio de tensão de neutro. Esses métodos de proteção eliminam a necessidade de instalar CVTs na alta tensão e proporcionam proteção de desbalanço de tensões diferenciais mais sensíveis e seguras pelo fato do modelo ser insensível a variações de tensão no sistema e variações da capacitância induzidas pela temperatura.

2. Os custos do projeto da proteção, instalação e manutenção são reduzidos pelo uso eficiente das entradas, saídas e funções de proteção do relé numérico.

3. PG&E adaptou o modelo de banco de capacitores em derivação sem fusível como padrão para sua rede de alta tensão devido a sua eficiência e segurança nas operações de monitoramento, detectando problemas e alertando a equipe, bem como a economia para sua instalação e manutenção.

4.PG&E planeja projetar seus futuros banco de capacitores usando novos métodos que levam vantagem da última tecnologia para melhorar e simplificar o projeto de proteção de barra, simplificar o projeto de controle e melhorar o monitoramento de toda a instalação. Esses métodos eliminam a necessidade de medidores e controles manuais, reduz a quantidade de cabos no pátio e casa de controle e proporciona isolação através do uso de cabos de fibra óptica.

5. Novas maneiras de melhorar todo o projeto de proteção e controle para banco de capacitores em derivação, reduzem substancialmente o investimento inicial e futuros custos de manutenção.

REFERÊNCIAS

[1] ANSI/IEEE Standard 18-1992, IEEE Standard for Shunt Power Capacitors.

[2] ANSI/IEEE C37.99-1990, IEEE Guide for Protection of Shunt Capacitor Banks.

[3] John E. Harder, “Developments in Capacitor Protection,” Proceedings of the 11th IEEE/PES Transmission and Distribution Conference and Exposition, New Orleans, Louisiana, 1990.

[4] John E. Harder, “Capacitor Bank Protection,” Presented at the Minnesota Power Systems Conference, St. Paul, Minnesota, October 1987.

[5] John E. Harder, “Fuseless Substation Capacitor Banks,” Presented at the Pennsylvania Electric Association, Lancaster, Pennsylvania, June 1990.

BIBLIOGRAFIAS

Demetrios A. Tziouvaras nasceu na Grécia e mudou-se para os EUA em 1977. Recebeu seu grau de B.S e M.S em engenharia elétrica pela Universidade do Novo México e Universidade de Santa Clara, respectivamente. Juntou-se ao Grupo de Proteção de Sistema da Pacific Gás & Electric co. em 1980, onde se manteve na posição de Engenheiro Principal e foi responsável pela aplicação de novas tecnologias, normas de projeto e automação da subestação. Juntou-se ao Grupo de Pesquisa e Desenvolvimento da Schweitzer Engineering Laboratories em 1998 onde é engenheiro de pesquisa. É membro sênior no Institute of Electrical and Electronic Engineers (IEEE) e membro da Power System Relaying Committee of the Power Engeineering Society of IEEE. É membro de duas subcomissões e presidente de dois grupos de trabalho, um no grupo de Aplicações do EMTP para Proteção de Sistemas de Potência e o outro no de Modelos Matemáticos para Transformadores de Corrente, Tensão e Tensão de Capacitor de Acoplamento. É autor e co-ator de vários artigos técnicos e ministrou seminários em EMTP, relé de proteção e relé digital na Universidade de Illinois na Urbana-Champaign e no Instituto Politécnico da Califórnia em San Luis Obispo, Califórnia. Seus interesses incluem modelos de relé digital, proteção de sistemas de potência e transitórios de sistema de potência. Possui várias patentes pendentes.

Malkiat S. Dhillon nasceu na India. Recebeu seu grau de B. S. em engenharia elétrica na Universidade de Panjab, Chandigarh, Índia, e seu grau de M. S. em engenharia elétrica na Universidade do Estado da Califórnia, Sacramento. É engenheiro elétricista registrado na Califórnia. Juntou-se ao Grupo de Projeto de Transmissão da Pacifc Gas e Electric co. em 1981 e foi para o Grupo de Proteção de Sistema em 1983. É engenheiro de proteção sênior e é responsável pela proteção dos sistemas de 500 kV da PG&E. Também trabalhou em projetos especiais. No passado foi responsável pela elaboração de normas, avaliação de novos produtos e automação de subestações.